

УДК 622.014.2 : 658.011.56

**УЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ
ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПЛАНИРОВАНИИ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТ**

В. В. Лаптев, К. П. Гурин

Горный институт КНЦ РАН,

E-mail: v.laptev@ksc.ru, k.gurin@ksc.ru, ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Анапиты, Россия

Описан алгоритм многофакторного учета горно-геологических и горнотехнических ограничений, критериев определения момента начала работ в зависимости от наличия ресурсов, позволяющий учитывать многообразие возможных комбинаций условий проходки или отработки каждого подземного геотехнологического объекта. Разработанный алгоритм является частью цифрового инструмента автоматизированного планирования подземных горных работ в горно-геологической информационной системе Mineframe.

Планирование подземных горных работ, горно-геологические информационные системы, моделирование производственных процессов, ресурсные ограничения, горнодобывающие предприятия

DOI: 10.15372/FTPRPI20230316

Традиционно при краткосрочном планировании подземных горных работ основными становятся задачи распределения имеющихся ресурсных ограничений горнодобывающего предприятия (персонала, парка техники) с учетом текущего положения горных работ (горно-геологической и горнотехнической обстановки вокруг построенных, обрабатываемых и запланированных объектов подземной геотехнологии). Определение оптимальной последовательности отработки выемочных единиц решается при средне- и долгосрочном планировании.

Для ряда систем разработки из-за повышенной концентрации горных работ и особых технологических условий их ведения при планировании важно согласовать последовательность отработки элементарных выемочных единиц, под которыми понимаются объемы, освоенные одним циклом очистных или проходческих работ (например, подвигание забоя выработки на длину одной уходки после отбойки комплекта шпуров и извлечения отбитой горной массы; проход комбайном одной “стружки” при столбовой системе разработки и т. п.).

Слоевая система разработки с твердеющей закладкой применяется при выемке ценных руд для сохранения геометрии выработанного пространства. В варианте нисходящей выемки слоев руду добывают из параллельно расположенных очистных выработок, которые после проходки заполняются твердеющей закладкой. После достижения нормативной прочности закладки (7–30 дн.) работы могут проводиться в выработках, смежных с заложеной (рядом с ней или под ней). Пока выработка не заложена или закладка не набрала прочность, ведение работ возможно лишь на безопасном расстоянии от них. Из-за несоблюдения технологии закладочных

работ в выработках случаются вывалы, требующие дополнительных операций по ликвидации их последствий. Среди опасных факторов, замедляющих темпы ведения горных работ, выделяют наличие обводненных, ослабленных и нарушенных участков массива [1]. Кроме того, рудные тела нередко включают в себя прослойки твердых пород, что вызывает необходимость перехода на другой тип оборудования.

Краткосрочное и среднесрочное планирование состоит в учете специалистами технического отдела рудника всех перечисленных нюансов условий ведения горных работ в каждой выработке. Добиться повышения точности планирования возможно благодаря применению цифровых технологий, которые позволяют полноценно учитывать условия ведения горных работ. При краткосрочном планировании подземных горных работ на предприятиях, отрабатывающих месторождения в сложных горно-геологических условиях, важную роль играют вопросы последовательности отработки элементарных выемочных единиц с учетом текущего положения горных работ: горно-геологической и горнотехнической обстановки вокруг построенных, отрабатываемых и запланированных объектов подземной геотехнологии. Формирование плана работ вручную или в специализированном программном обеспечении, которое не позволяет автоматически учитывать горно-технологические особенности ведения горных работ, требует от специалистов предприятия значительного объема дополнительной работы, связанной с поиском и актуализацией необходимой информации. Подобная работа подвержена сильному влиянию человеческого фактора.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ

Применение программных средств инженерного обеспечения горных работ за достаточно короткий срок менялось от моделирования отдельных геологических и горных объектов до решения сложных задач проектирования, планирования и управления горными работами. Одним из самых востребованных цифровых инструментов решения технологических задач на производстве становится планирование горных работ, от которого требуется получение не просто рационального алгоритма ведения работ, но и возможность его оптимизации по различным критериям [2].

Автоматизированное планирование стало частью рабочего процесса, как только появилась возможность цифрового моделирования запасов полезного ископаемого, геометрии выемочных единиц и последовательности их отработки [3–6]. По мере развития математического аппарата и алгоритмов решения оптимизационных задач разрабатывались программные средства планирования горных работ, где основной акцент делался на выборе рациональной последовательности отработки выемочных единиц, представленных, как правило, блочными моделями, без учета технологии подготовки и особенностей отработки запасов полезного ископаемого [7]. Подобный подход в целом применим для решения задачи долгосрочного планирования, однако уменьшение периода планирования (до квартала, месяца и недели) требует учета технологических возможностей предприятия (проходка выработок, обеспечение безопасных условий работы, наличие необходимого оборудования и персонала) для реализации предлагаемого алгоритма [8].

В настоящее время имеются решения выбора последовательности отработки элементарных выемочных единиц вручную или с помощью команд-макросов [9–14], однако они не позволяют существенно улучшить качество планирования, не обладают средствами автоматизированного учета многообразия горно-геологических и технологических ограничений [15].

Современные тенденции в области автоматизации решения задач горной технологии связаны с горно-геологическими информационными системами (ГГИС), выполняющими одновременно функции базы данных и виртуального пространства для реализации цифровых инструментов решения геологических, маркшейдерских и технологических задач [16]. ГГИС позволяют организовать постоянное пополнение базы данных цифровых моделей актуальной информацией о запасах полезного ископаемого и геолого-структурных особенностях месторождения, о геометрии выработанного пространства, о напряженно-деформированном состоянии массива, о существующих объектах горной технологии и их особенностях, о планах развития горных работ и добычи полезного ископаемого.

Реализация концепции единого геоинформационного пространства ГГИС, помимо явных преимуществ прямого доступа заинтересованных лиц к актуальной информации о текущем состоянии горных работ, предоставляет возможность автоматизированного учета горно-геологических и горнотехнических условий расположения каждого геотехнологического объекта в инженерных расчетах, в том числе при планировании подземных горных работ.

Основываясь на данных возможностях, на платформе ГГИС Mineframe разработан инструмент автоматизированного планирования подземных горных работ, особенность которого автоматизированный учет горно-геологических условий ведения горных работ.

ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ

Модели объектов (рудные тела, структурные нарушения, выемочные единицы, проектные и фактические выработки, закладочный массив и т. п.) — исходные данные для создания сценария развития горных работ. В качестве дополнительной информации используются справочники имеющихся кадровых и технических ресурсов. Работа с инструментом автоматизированного планирования подземных горных работ состоит из нескольких этапов:

- подготовка исходных данных для расчета сценария планирования;
- итерационный расчет плана горных работ;
- завершение создания сценария — сохранение результатов и формирование отчетов.

Каждый из этапов состоит из последовательно выполняемых шагов.

Подготовка исходных данных для расчета сценария планирования. На основе фактических и проектных моделей горных выработок, а также их расположения в пространстве автоматически определяется текущее положение горных работ, которое представляется в виде графа из осей выработок и является основой для дальнейших расчетов. Участки выработок между забоями и/или сопряжениями выработок становятся ребрами графа, а сами забои или сопряжения — его узлами. Заданные правила подготовки и отработки выемочных единиц и транспортная схема рудника позволяют автоматически проводить расчет направлений проходки (с решением задачи оптимизации транспортных затрат) и определение приоритетов отработки объектов [16]. С помощью анализа пространственно привязанных данных о геолого-структурных особенностях массива и технологических объектах в границах планирования горных работ автоматически подбирается оптимальная технология отработки каждой выработки [17–19] и выемки горной массы с последующей закладкой выработанного пространства. Построенный граф связности осей выработок автоматически дополняется следующей информацией для расчетов:

- относительно каждого ребра графа устанавливается необходимость разбивки его на несколько новых ребер для проходки участка выработки встречными забоями;
- автоматически для каждого ребра определяется направление проходки от одного узла к другому в зависимости от положения этого участка выработки относительно существующих забоев и расстояния доставки горной массы;
- на основе расставленных приоритетов и технологических ограничений каждому участку назначаются связи с другими участками, которые должны быть обязательно пройдены (или заложены) до начала работ на текущем участке;
- по указанным геометрическим и технологическим параметрам выставляются связи участков для учета предохранительных целиков в процессе отработки плана;
- на каждое ребро графа автоматически по горно-геологическим и горнотехническим условиям его расположения назначаются циклограммы в зависимости от допустимых условий применения той или иной технологии; определяется количество проходческих и закладочных циклов, необходимых для отработки каждого участка выработки.

Назначение циклограмм на участки выработок является способом задания технологии ее проходки или закладки. Отдельная циклограмма состоит из набора процессов, для выполнения каждого из которых требуется установленное количество персонала с определенной квалификацией, а также оборудование. Набор процессов и применяемое оборудование в циклограмме реализуют какую-либо технологию ведения работ (например, механическую или буровзрывную отбойку горной массы, применение различных видов крепления). По завершении имитации процесса отработки в каждом цикле присутствует информация о том, какое оборудование задействуется, сколько человек и с какой квалификацией для этого необходимо, какое на это потребуется время, какие расходные материалы используются, каков объем проводимых работ. В дальнейшем после имитации отработки участка выработки, т. е. завершения в нем всех циклограмм одного типа — проходческого или закладочного, инструмент планирования меняет состояние данного ребра графа, например с “не пройден” на “пройден”. Это позволяет применять к нему последующие действия, в частности, возможность прокладывать через него маршруты доставки горной массы.

Реализация процедуры автоматического определения технологии отработки каждого участка выработки назначением на него циклограмм позволяет автоматически учитывать при планировании вариативность применяемых технологий проходки в многообразии комбинаций горно-геологических и горнотехнических условий расположения каждого участка выработки, включая физико-механические свойства отбиваемой горной массы, наличие и удаленность от текущего забоя других объектов геотехнологии, в том числе потенциально опасные для ведения горных работ области.

Данный подход приближает разрабатываемый сценарий ведения горных работ к реальному и значительно снижает влияние человеческого фактора.

Итерационный расчет плана ведения горных работ. Чтобы правильно согласовать последовательность выполнения горных работ, необходимо свести воедино модели, правила и ограничения. Разработаны алгоритмы многофакторного учета горно-геологических и горнотехнических ограничений, а также критериев начала работ в зависимости от наличия ресурсов, включающие следующие пункты:

- физическая возможность начала горных работ в каждом проходческом и очистном забое;

- технологическая корректность начала горных работ в каждом забое (выполнение условий по правилам подготовки и нарезке блока);

- безопасность отработки (сохранность предохранительных целиков вокруг выработок с учетом процессов ведения закладочных работ и времени набора закладкой нормативной прочности);

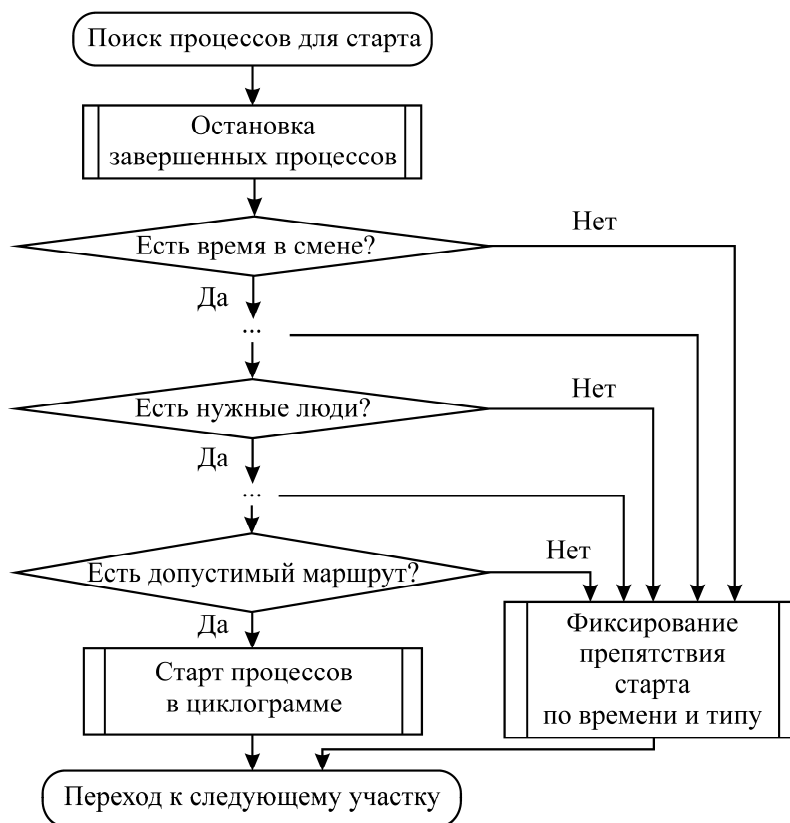
- наличие необходимого количества людских и технических ресурсов с учетом специализации имеющегося персонала и характеристик техники и оборудования (включая необходимость проведения планово-предупредительных ремонтов);

- возможность транспортировать отбитую горную массу от забоя до конечного пункта разгрузки (наличие пути до подходящего приемного пункта горной массы (рудоспуска), возможность приемного пункта вместить в себя перевозимый объем);

- расчет фактического времени отработки элементарной выемочной единицы в зависимости от крепости пород и применяемого оборудования, времени доставки горной массы до рудоспуска с учетом длины маршрута, характеристик перемещаемой горной массы и применяемой техники.

Завершенный сценарий планирования содержит информацию о состоянии горных работ на любой момент времени. Чтобы сократить количество расчетов за весь период планирования, по мере анализа каждого ребра графа добавляются ключевые триггеры (время завершения процесса, начало новой смены и т. д.), которые могут повлиять на условия старта или продолжения работ. В результате получается итерационный цикл расчета сценария с переменным шагом вычислений, где в первую очередь достигается цель в виде завершения начатых технологических процессов. Процесс заканчивается, как только для текущей итерации расчета проверяемое время становится равным или большим, чем плановое время его завершения. Во вторую очередь проверяется условие, по которому все работы на активном участке выработки должны завершиться. Если все циклограммы рассматриваемого типа завершены, то изменяется состояние участка выработки и указывается необходимость пересчета маршрутной схемы.

Поиск элементарной выемочной единицы, в которой должны начинаться работы в заданный момент времени, представляет собой последовательную проверку ограничений и критериев начала работ (рисунок). Последовательность проверок ранжирована с учетом их значимости применительно к конкретным условиям планирования. Если хотя бы один критерий или ограничение не позволяют начать работы, то это условие и время его срабатывания фиксируются, работы в данной элементарной выемочной единице приостанавливаются до устранения причины. В дальнейшем по рассчитанному сценарию планирования возможно провести анализ накопленной информации о причинах и частоте остановок работ для выявления узких мест и принятия соответствующих решений. Например, при частой остановке работ из-за нехватки буровых установок, можно рассмотреть необходимость увеличения парка данного вида оборудования или его перераспределения. Если все условия выполняются, то запускается первый незавершенный процесс в циклограмме. В нем фиксируются список работников из бригады, чтобы исключить их дублирование в других процессах, и используемая техника, а также определяется плановое время завершения процесса.



Блок-схема алгоритма учета условий начала работ

Если работы начинаются на сопряжении выработок, то зачастую необходимо учесть особенности ведения работ с точки зрения синхронизации проводимых процессов в смежных выработках и корректного учета отбиваемых объемов. Сопрягающиеся ребра графа частично находятся внутри одной выработки, что может привести к повторному учету уже отработанных объемов горной массы. Чтобы исключить дублирование обрабатываемых объемов, на этапе подготовки сценария планирования автоматически определяется очередность проходки выработок и на ребрах у сопряжения проставляются метки, позволяющие корректно назначить циклограммы на ребра графа вблизи сопряжений.

Обработка результатов. Все результаты подготовки сценария и его непосредственного расчета записываются в базу данных в виде синхронизированного по времени процесса изменения состояния моделей выработок. Сценарий содержит в себе исходные данные о состоянии участков выработок и положении забоев в них, о запасах полезного ископаемого, о настройке сценария планирования и рассчитанной последовательности выполнения работ. Это позволяет сформировать набор графической и табличной документации:

- анимация сценария развития горных работ на весь период планирования;
- графические планы по разным критериям на определенный момент времени;
- табличные отчеты по объемам добытой горной массы с привязкой к бригадам, технике, выработкам, блокам, горизонтам и др.;
- наработки и простои техники, планируемые даты выбытия техники на планово-предупредительный ремонт;
- нагрузка на элементы транспортной схемы;
- сведения об узких местах в заданном сценарии планирования.

Кроме того, возможно сравнение сценариев между собой по ключевым показателям.

ВЫВОДЫ

Разработанный алгоритм многофакторного учета ограничений и критериев используется в цифровом инструменте автоматизированного планирования подземных горных работ и позволяет учитывать горно-геологические и горнотехнические условия их ведения, имеющиеся у предприятия ресурсы, правила безопасности и особенности применяемой системы разработки.

На основе анализа ограничений и критериев при помощи инструмента автоматически готовятся различные технологические решения; определяются оптимальные направления ведения горных работ, последовательность проходки выработок, количество забоев в одновременной работе, применяемую в каждом геотехнологическом объекте технологию отработки.

Совокупность алгоритмов и методов автоматизированного планирования, реализованных на платформе ГГИС Mineframe, развивает концепцию единого геоинформационного пространства, что позволяет снизить влияние человеческого фактора при ведении сложных инженерных расчетов. Как результат, повышается точность и качество формируемых планов развития горных работ, увеличивается скорость их подготовки, обеспечивается возможность оперативного сравнения различных сценариев между собой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бадж М. Н. Предотвращение и контроль разубоживания руды закладочным материалом в условиях подземной добычи // ФТПРПИ. — 2021. — № 6. — С. 131 – 141.
2. Научные и практические аспекты применения цифровых технологий в горной промышленности: монография / под науч. ред. С. В. Лукичева. — Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2019. — 192 с.
3. Чаплыгин Н. Н., Близинок Г. И., Чуркин О. Е., Мызников А. В., Малиновская М. П. Годовое планирование подземных горных работ на ЭВМ / Сб. науч. тр.: Анализ систем и управление ими в горном производстве. — Апатиты: ГоИ КФ АН СССР, 1988. — С. 15 – 19.
4. Чуркин О. Е., Малиновская М. П. Информационное обеспечение имитационной модели технологии подземной добычи руды / Сб. науч. тр.: Анализ систем и управление ими в горном производстве. — Апатиты: ГоИ КФ АН СССР, 1988. — С. 19 – 24.
5. Чаплыгин Н. Н., Близинок Г. И., Чуркин О. Е., Мызников А. В., Малиновская М. П. Моделирование развития подземных горных работ / В сб. тезисов докладов Всесоюзной науч.-техн. конф. “Теория и практика проектирования, строительства и эксплуатации высокопроизводительных подземных рудников”. — М.: МГИ, 1990. — С. 209.
6. Белгородцев О. В., Савин Е. М. Автоматизированное планирование подземных горных работ // Черная металлургия. Бюлл. науч.-техн. и эконом. информации. — 2013. — № 10. — С. 15 – 19.
7. Лукичев С. В., Наговицын О. В. Цифровая трансформация горнодобывающей промышленности: прошлое, настоящее, будущее // Горн. журн. — 2020. — № 9. — С. 13 – 18.
8. Лукичев С. В., Наговицын О. В., Ильин Е. А., Рудин Р. С. Цифровые технологии инженерного обеспечения горных работ — первый шаг к созданию “умного” добычного производства // Горн. журн. — 2018. — № 7. — С. 86 – 90.
9. Планирование горных работ в горно-геологической системе MINE ADVISOR [Электронный ресурс]. URL: <https://sight-power.com/ru/solutions/mine-planning-automation>.
10. Manríquez F., Pérez J., and Morales N. A simulation–optimization framework for short-term underground mine production scheduling, Optimization Eng., 2020, No. 21. — P. 939 – 971.

11. Туртыгина Н. А., Сидоров Д. В. Планирование качества рудоминерального сырья при развитии горных работ // Науч. вестн. Арктики. — 2018. — № 4. — С. 11–17.
12. Стадник Д. А., Габараев О. З., Стадник Н. М., Тедеев А. М. Совершенствование методических основ автоматизированного календарного планирования развития горных работ при проектировании подземной отработки рудных месторождений // ГИАБ. — 2020. — № 11-1. — С. 189–201.
13. Белогородцев О. В., Наговицын О. В., Савин Е. М. Модуль планирования горнопроходческих работ в программном комплексе MINEFRAME // ГИАБ. — 2014. — № 7. — С. 268–272.
14. Andrade A. B. and Rampazzo P. C. B. Understanding plan's priorities: short term scheduling optimization, application of computers and operations research in the mineral industry, Proc. 39th Int. Symp. APCOM, Wroclaw, Poland, 2019. — P. 386–392.
15. Димитракопулос Р. Стратегия планирования горных работ в условиях неопределенности и риска // ФТПРПИ. — 2011. — № 2. — С. 5–18.
16. Наговицын О. В., Лукичев С. В. Горно-геологические информационные системы — история развития и современное состояние. — Апатиты: КНЦ РАН, 2016. — 196 с.
17. Лаптев В. В., Звонарева С. В. Расчет параметров транспортирования горной массы при автоматизированном планировании подземных горных работ // ГИАБ. — 2022. — № 2. — С. 70–80.
18. Lukichev S. V., Nagovitsyn O. V., and Laptev V. V. Digital tools for underground mine planning: Cut-and-fill mining, Eurasian Min., 2021, No. 1. — P. 75–78.
19. Lukichev S. V., Nagovitsyn O. V., and Laptev V. V. Short- and medium-term planning of underground mining operations, Proc.: Application of computers and operations research in the minerals industries. The Southern African Institute of mining and metallurgy, Johannesburg, 2021.

Поступила в редакцию 24/III 2023

После доработки 24/IV 2023

Принята к публикации 18/V 2023